

ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДЕНОГО ІНДУКТОРА ІЗ ДОПОМІЖНИМ ЕКРАНОМ РАЗОМ ІЗ ЗАГОТОВКОЮ

Лавінський Д.В., канд. техн. наук, **Морачковський О.К.**, докт. техн. наук, проф.
(Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина)

У статті розглянуто деформування складеного багатовиткового індуктора із допоміжним екраном та заготовки в рамках технологічної операції магнітно-імпульсної обробки матеріалів. Задача розв'язувалась за допомогою чисельного методу, що базується на методі скінчених елементів. Віднайдено розподіл електромагнітного поля та проаналізовано пружно-пластичне деформування індуктора та заготовки.

Ключові слова: пружно-пластичне деформування, електромагнітне поле, магнітно-імпульсна обробка матеріалів, метод скінчених елементів

В статье рассмотрено деформирование составного многовиткового индуктора со вспомогательным экраном и заготовки в рамках технологической операции магнитно-импульсной обработки материалов. Задача решалась при помощи численного метода, который основан на методе конечных элементов. Найдено распределение электромагнитного поля и проанализировано упруго-пластическое деформирование индуктора и заготовки.

Ключевые слова: упруго-пластическое деформирование, электромагнитное поле, магнитно-импульсная обработка материалов, метод конечных элементов

The article considers the deformation of compound multi-turn coil with an assistant screen and the workpiece under the technological operation of electromagnetic forming. The problem was solved by numerical method which based on the finite element method. The distribution of electromagnetic field is defined and elastoplastic deformation of the coil and workpiece is analyzed.

Key words: inelastic deformation, electromagnetic field, electromagnetic forming, finite element method

Електромагнітне поле (ЕМП) є невід'ємною умовою роботи для великої кількості технічних та технологічних систем. У технологічних процесах енергія ЕМП використовується, наприклад, для впливу на властивості оброблюваного об'єкту, а також для здійснення високоінтенсивного теплового та силового впливу. Велика група технологічних операцій, які використовують енергію ЕМП для створення силового впливу на заготовку об'єднується під назвою магнітно-імпульсна обробка матеріалів (МІОМ). Огляд історичного розвитку операцій МІОМ, їх класифікація, конструкції технологічного оснащення та перспективи розвитку у достатній мірі викладено у оглядовій статті [1].

Основним конструктивним елементом технологічного оснащення МІОМ є індуктор (соленоїд), який призначено для створення імпульсів ЕМП. При взаємодії струму індуктора із наведеним струмом у заготовці і виникає потужна силова взаємодія, яка призводить також і до деформування індуктора. Взагалі, мету технологічної операції МІОМ можна вважати досягнутою, якщо індуктор залишається працездатним, а при цьому у заготовці виникають зони пластичних деформацій. Розрахункові оцінки досягнення мети технологічної операції МІОМ вимагають інформації про розподіл векторних та тензорних компонентів напружено-деформованого стану (НДС) стосовно індуктора та заготовки. Су-

часний підхід до аналізу НДС у електропровідних тілах, які піддані дії ЕМП, потребує попереднього визначення розподілу його векторних компонентів. Застосування чисельних методів, таких як метод скінчених елементів (МСЕ), дозволяє проводити дослідження розподілу ЕМП та НДС у рамках єдиної розрахункової схеми, геометрія якої є максимально наближеною до геометрії реальних об'єктів.

Конкретні реалізації чисельних методів мають базуватися на відповідних моделях зв'язаної термомеханіки суцільного середовища. Вплив ЕМП на електропровідне тіло може моделюватись за допомогою введення електромагнітних сил та моментів. Рівні сил, які викликаються «магнітною» складовою ЕМП є набагато вищими ніж ті, які викликаються «електричною» складовою. Тому, для задач, в яких головною метою є оцінювання процесу деформування основою може служити теорія магнітопружності. Основи теорії магнітопружності з урахуванням ефектів зв'язаності ЕМП і механічних полів напружень і деформацій в рухомому електропровідному тілі (у загальному випадку тіло є поляризованим і таким, що намагнічується), були закладені в роботах Кнопоффа і Чадвіка [2,3].

Повна математична постановка задачі пружно-пластичного деформування систем електропровідних тіл при дії ЕМП з урахуванням контактної взаємодії, а також чисельний метод на базі МСЕ наведено у роботах [4–6]. У рамках представленої постановки із застосуванням запропонованого чисельного методу проведені розрахунки ЕМП та НДС у системах «індуктор – заготовка» за умов технологічної операції притягнення тонких заготовок з феромагнітних матеріалів. Тут розглядався масивний одновитковий індуктор із робочим отвором конічної форми, який виконано із неферомагнітного матеріалу.

Також виникають потреби у притягненні заготовок із неферомагнітних матеріалів, для чого запропоновано використовувати складені індуктори із допоміжними сталевими екранами [7]. У роботі [8] розглядається розрахункове визначення компонентів ЕМП та НДС у разі складеного одновиткового індуктора. Аналіз дозволяє зробити висновок, що в цьому випадку при експлуатаційних значеннях величини сили струму індуктора не можливо здобути величини електромагнітної сили, які б гарантували виникнення у заготовці пластичних деформацій. Збільшення величини сили струму призводить до того, що пластичні деформації виникають у струмопроводі, а також порушується цілісність індуктора. Вирішення цієї проблеми полягає у використанні багатовиткових індукторів.

Розглянемо розрахункову схему складеного багатовиткового індуктора із допоміжним екраном разом із заготовкою. Геометричні параметри елементів розрахункової схеми (рис.1) є наступними: кількість витків – 11, $R_1 = 70 \text{ mm}$, $R_2 = 100 \text{ mm}$, $H = 22 \text{ mm}$, $h_1 = 1 \text{ mm}$, $h_2 = 2 \text{ mm}$, $h_3 = 1 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, товщина ізоляції струмопроводу – 1 mm.

У табл. 1 наведено фізико-механічні параметри елементів системи. Джерелом ЕМП обирався струм, що був рівномірно розподіленим по перерізу витків струмопроводу, у часі густина струму змінювалась за законом:

$j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi f t} \cdot \sin(2\pi f t)$, де амплітуда сили струму $I_m = 40$ кА, частота $f = 2$ кГц, відносний коефіцієнт затухання $\delta = 0.3$.

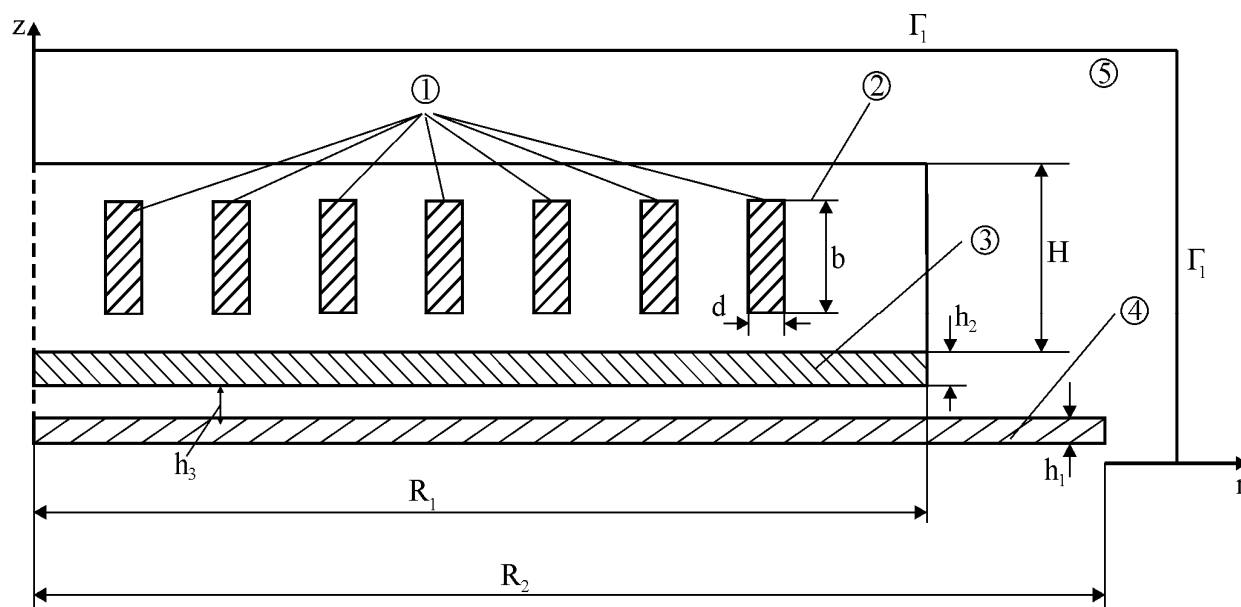


Рис. 1 – Розрахункова схема складеного багатовиткового індуктора із допоміжним екраном та заготовки: 1 – багатовитковий струмопровід; 2 – допоміжний екран; 3 – діелектричний бандаж; 4 – заготовка

Таблиця 1

Фізико-механічні параметри елементів системи

	Струмопровід, мідь	Допоміжний екран, сталь	Заготовка, сталь	Ізоляція, капролон	Повітря
μ_r	1	1	1	1	1
$\gamma, (\Omega\text{m})^{-1}$	7×10^7	$0,2 \times 10^7$	$0,2 \times 10^7$	0	0
E , ГПа	180	215	200	2,5	—
ν	0,33	0,27	0,29	0,3	—
σ_T , МПа	200	270	220	—	—
σ_B^+ , МПа	—	—	—	70	—
σ_B^- , МПа	—	—	—	90	—

Одержані просторово-часові розподіли векторних компонент ЕМП та компонент електромагнітної сили уздовж поверхні заготовки дозволили зробити висновки про можливі місця максимального силового впливу на заготовку. Максимальні значення електромагнітної сили спостерігаються у околі центральних витків індуктора на початку імпульсу. Сумісне деформування індуктора та заготовки розглядалось у момент часу, що відповідає максимальним значенням електромагнітної сили, результати надані для часового максимуму.

З рис. 3 видно, що переміщення заготовки значно перевищують переміщення індуктора. Максимальні значення переміщень заготовки спостерігаються в околі її центру.

Відзначимо, що інтенсивність напружень у заготівці перевищує межу текучості її матеріалу, величини інтенсивності напружень у матеріалі струмопроводу, екрану та ізоляції не перевищують критичних значень. Також аналіз контактної взаємодії екрану та ізоляції індуктору показав, що екран не відходить від ізоляції.

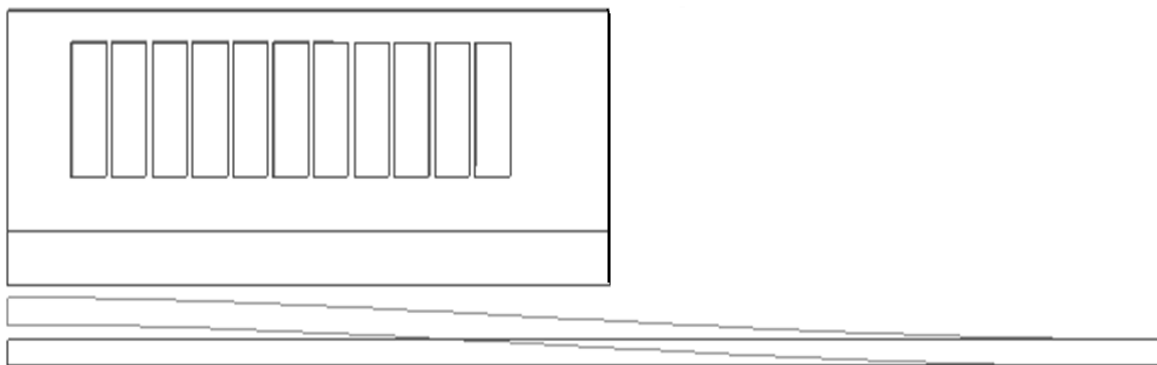


Рис. 3 – Деформований стан індуктора і заготовки за максимальних значень електромагнітної сили

Таким чином, за обраних геометричних параметрів та умов зовнішнього впливу технологічна операція МІОМ, яка спрямована на притягнення заготовок із метою виправлення дефектів є ефективною, при цьому індуктор залишається працездатним.

Список літератури: 1. *Psyk V. et al.* Electromagnetic forming—a review // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – Т. 211. – №. 5. – С. 787-829. 2. *L. Knopoff*. The interactions between elastic waves motions and a magnetic field in electric conductor, *J. Geophys., Res.* 60, – 1955, pp 441–456. 3. *P. Chadwick*. Elastic wave propagation in a magnetic field, in: *Actes IX Congr. Intern. Mech. Appl.*, Vol. 7, Univ. Bruxelles, Bruxelles, – 1957, pp. 143–158. 4. *Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Lavinsky D.* Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 27 (12), 1-13 (2015). 5. *Лавінський Д. В.* Пружно-пластичне деформування систем тіл при дії електромагнітних полів / *Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський* // *Вісник Запорізького національного університету* : зб. нак. ст. Фізико-математичні науки. – Запоріжжя : ЗНУ, 2015. – № 2. – С. 125-135. 6. *Lavinskii D.V., Morachkovskii O.K.* Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. *Strength of Materials*. 2016. Vol. 48, No.6. PP. 760-767. 7. *Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V.* Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, Vol.214 (2), p. 390-401. 8. *Lavinsky D.V.* The nonlinear deformation of the compound structures under electromagnetic forming / *D.V. Lavinsky* // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – №39 (1261). – С.95-98.